

## 【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 26-142

補助事業名 平成26年度 熱流体の速度計測システムの高精度な性能評価を実現する  
新型校正技術の開発 補助事業

補助事業者名 神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部 助教・白井 克明

### 1 補助事業の概要

#### (1) 事業の目的

現代の高度なものづくりでは、製品の品質化を実現する計測制御技術が欠かせない。制御の指針は計測器による計測を基になされ、より速く確かな計測技術の開発が続けられている。他方、計測の際の不確かさの一部は計測器自体の不確かさによるものであり、そのトレーサビリティの確保が求められる。熱流体プロセスの制御においてもそれは例外でなく、圧力や温度、流量などの計測不確かさを把握し、不確かさトレーサビリティを確保することが望まれる。

数多くの熱流体の計測手法の中にはレーザー光を用いた非接触で計測を実現する手法があり、従来の計測プローブ挿入が困難もしくは望まれない場面で使われている。レーザー流速計の中でも、レーザードップラー流速計 (LDV=Laser Doppler Velocimetry) は1964年の開発以来50年以上の歴史があり、流体計測において信頼性の高い計測手法として用いられる。LDVは計測対象の流れに干渉縞を形成しておき、そこを通過する微粒子による散乱信号のドップラー・ビート周波数が流速に比例することから流れの速度を求める。LDVは周波数計測であることから原理的にトレーサビリティ確保が可能であり、日本・アメリカ・ドイツにて気体の流量標準として定められている。しかしながら、標準研究所以外では一部を除きLDVの不確かさに関して広く認識されていない。

LDVの不確かさを求めるにあたり、校正が鍵となる。LDVの校正とは、干渉縞の間隔を求めることに他ならず、干渉縞間隔は既知の校正速度とドップラー周波数計測から算出される。LDV校正には従来から一定速度の回転円盤に取り付けた点散乱物体の接線速度が用いられてきた。ところが、散乱点の軌道半径を直接知ることができないことが原因で校正不確かさが増大し、時としてLDVの不確かさを越えることが指摘されている。

申請者はレーザ流速計に着目し、不確かさを定量化するとともに、その低減を目指している。国家標準以外で行われる校正の不確かさ低減を目指し、新たな校正方法を提案している。新校正法は個々の流速計ユーザーが実験室外においても使用でき、小型で携行可

能である。さらに原理的に自動化が可能であり、レーザー計測に精通しない一般ユーザーに高度な校正を広く提供することが可能と見込まれる。

## (2) 実施内容

### (A) 概要

申請者は新たな LDV 校正法を開発し、校正不確かさを低減するとともに、不確かさとレーザビリティ確保の実現性を示してきた。これまでに、複数のピンホールを散乱点として用いた場合の校正性能に関して報告している。本事業では、従来用いていた複数ピンホールを単一スリットに換えた場合の新型校正法の性能について調べることを目的とした。スリットがピンホールと異なるのは、ピンホールが使用する個数で決まる有限個の離散点として機能するのに対し、スリットでは長手方向にほぼ連続してほぼ無限個の任意の位置を散乱点として使用可能な点にあり、校正システムの冗長性を高められる利点がある。

### (B) 原理

新校正法では、図1の原理図に示すように一定速度で回転する校正円盤上に長手方向が半径方向と一致するようにスリットを配置する。円盤の回転によりスリットがレーザー流速計の測定体積を通過する際に干渉縞の光が散乱される。つまり、スリット上の任意の地点のエッジが散乱点として機能する。各々の散乱地点でドップラー周波数を測定する。一つの散乱地点( $j$ 番目の地点( $j=1,2,\dots$ ))での計測後、精密リニアステージによって次の散乱地点( $(j+1)$ 番目の地点)まで円盤を半径方向に沿って移動させる。各散乱地点の位置は精密リニアステージに取り付けられた距離センサーによって記録される。図1のように、得られるドップラー周波数 $f_j$ は各散乱地点 $x_j$ における軌道半径 $r_j$ に比例( $f_j=u_j/d=r_j\omega/d$ ,  $u_j$ :校正速度,  $\omega$ :円盤回転角速度,  $d$ :干渉縞間隔)する。一方、リニアステージ座標と起動半径は同一直線上にあるため、ステージ座標とドップラー周波数は図2のように1次関数の関係( $f_j=Ax_j+B$ )にある。ステージ座標の原点と軌道半径の間にはオフセット $x_0$ が存在するが、そのオフセットは各散乱地点のステージ座標に共通して含まれる( $r=x-x_0$ )。よって、ステージ座標の原点は未知であるが、較正係数である干渉縞間隔はステージ座標とドップラー周波数の最小自乗法近似直線の傾き $A(=\omega/d)$ として求められる。新校正法の特徴は、直接知ることの困難な校正軌道半径を算出することなく、直線関係の傾きから干渉縞間隔 $d$ が求まることにある。

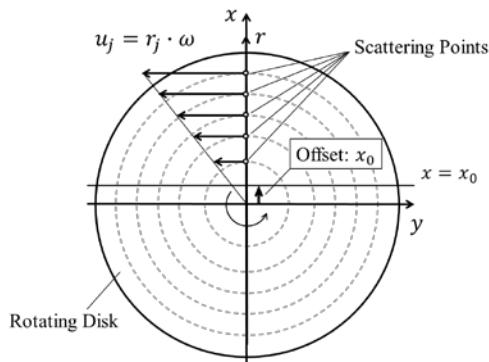


図1:新校正法の原理

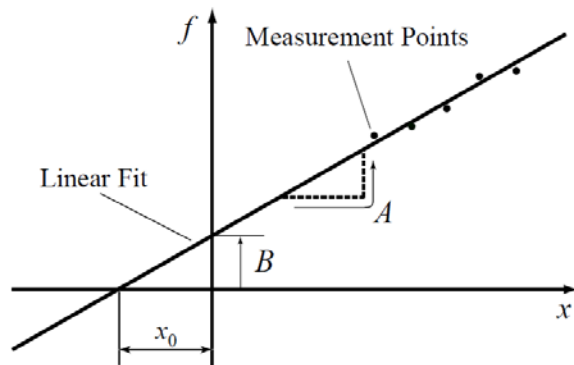


図2:ステージ座標とドップラー周波数の直線関係

### (C) 新型校正装置

校正装置の概要を図3に示す. アルミ製校正円盤にスリット(長さ3 mm, 幅5  $\mu\text{m}$ )が, 長手方向が円盤の半径方向と一致するように取り付けられている. 円盤はフランジを介してDCモーターに接続され, エンコーダーを用いた回路によって一定角速度で回転するよう制御した. 円盤を保持するモーターはさらに3軸ステージに取り付けられている. そのうちx軸方向はコンピューター制御の精密エンコーダー付き直線ステージであり, y方向には精密手動直線ステージおよびz方向には長距離駆動直線ステージを介して光学定盤に設置した.

校正対象には自作の作動型LDVシステムを用いた. 光源に半導体レーザーを, ビーム・スプリッターに等光路差プリズムを用いた. 作動距離は300 mm, 測定体積の大きさは $140 \times 275 \times 5200 \mu\text{m}$ と算出された. 受光部光学系にて前方散乱信号を観測し, マルチモード・ファイバーにて光検出器へ伝送され, 電気信号へ変換された. 光検出器からの信号はアンチ・エリアジング用のローパス・フィルターを介して出力した. 信号はデジタル・オシロスコープをA/D変換器として使い, シリアルケーブルを介してパソコン上から制御した. 計測信号はパソコンに取り込み, ドップラー・バースト信号の抽出, ソフトウェア・ハイパス・フィルタによるAC信号部分の抽出, フーリエ変換処理, 3点ガウス補間を通じてドップラー周波数を算出した. また, 円盤の回転角速度は回転毎に発生する隣り合うドップラー信号の発生時間間隔から算出した. 実験は精密自動ステージ駆動を除き, 全て自作Pythonプログラムで制御した.

実験は, 半径位置およそ17.5 mm地点を中心に 200  $\mu\text{m}$ ずつトラバースしての計14地点で精密ステージ位置とドップラー信号の計測を行った. 各地点でステージ位置を1回ずつ記録し, 1地点につき30個のドップラー信号サンプルを取得し個々のドップラー周波数を記録した. 計測データを基に干渉縞間隔 $d$ を求め, 国際度量衡委員会が発行する「計測における不確かさの表現ガイド」による不確かさ解析を行った. なお, 干渉縞間隔以外のパラメーターの不確かさ解析も算出した.

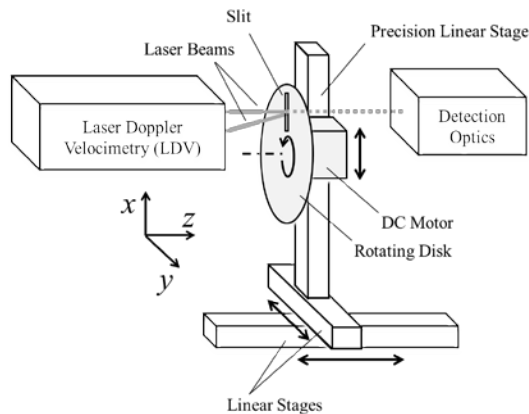


図3: 新型校正システム全体の模式図

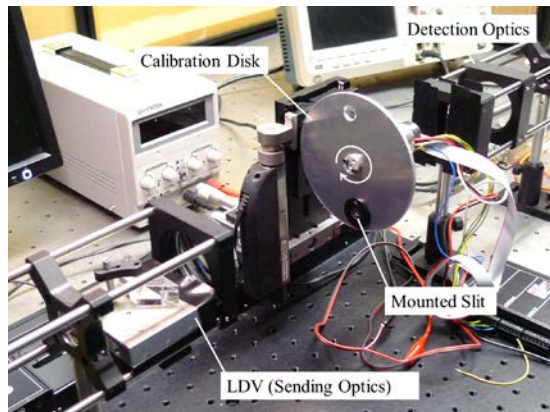


図4: 本事業で構築した校正システムの写真

(D) 性能

各計測地点のドップラー周波数を軌道半径と同一直線上のステージ座標  $x$  に対してプロットしたのが図 5 である。各地点のデータが直線近似上にほぼ一直線に並んでいることが分かり、スリットを用いた場合においても新型校正法に基づく校正が機能することが確認された。次に、不確かさ解析の結果を表 1 に示す。干渉縞間隔の不確かさ、つまり校正不確かさは 0.24% となり、これは LDV 自体の不確かさ下限界 0.3% よりも小さく、LDV の校正を行うに十分な性能を満たす。

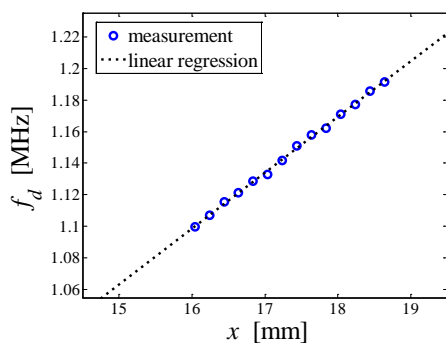


図5: 校正実験から得られたステージ位置とドップラー周波数の関係

表 1: 性能評価における各パラメーターの不確かさ

parameter	uncertainty [%]
fringe spacings $\sigma_d / d$	0.24
Doppler frequencies $\sigma_f / f$	0.33
angular velocity $\sigma_\omega / \omega$	0.24
slope of the linear fit $\sigma_A / A$	0.06
orbit radius $\sigma_r / r$	0.11

(E) まとめ

本事業では、申請者らの提案する新型校正法において、従来の複数ピンホールではなく単一スリットを初めて用いた。その結果、スリットを用いた場合においても新校正法の動作が確認され、不確かさ0.24%が実現された。これは、LDVの一般的な不確かさの可限界よりも小さく、校正に使用するのに十分な性能を実現できることが示された。今後は校正に使用するスリット上の点の散乱地点の影響や、校正円盤の振動低減、校正システムの完全自動化などに取り組む予定である。

## 2 予想される事業実施効果

本事業で新たに試みたスリットを用いた場合の新校正法の動作が確認され、従来の複数ピンホールを用いた場合よりも校正装置としての冗長性とロバスト性が向上したと考える。今後は校正装置の製品化を視野に入れ、校正不確かさ性能を0.1%程度まで低減することを目指す。さらに校正プロセスを完全自動化するなどして高度な校正を一般ユーザーに提供することを考えている。

## 3 補助事業に係る成果物

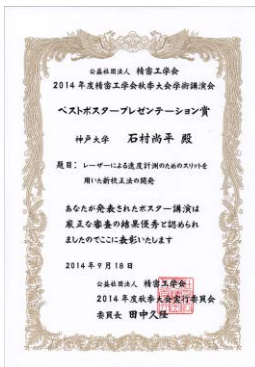
### (1) 補助事業により作成したもの

#### ① 国内学会発表(日本機械学会2014年度年次大会)

白井克明, 石村尚平, 川南剛, 平澤茂樹, 「レーザー速度計測における不確かさ低減を実現する新型校正装置の開発」, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 7~10 日, 東京, 情報・知能・精密機器部門:メカニカルデバイス・システムの知能化, J1610102(5 pages), (2014).

#### ② 国内学会発表(日本精密工学会 2014 年度秋季大会)

石村尚平, 白井克明, 川南剛, 平澤茂樹, 「レーザーによる速度計測のためのスリットを用いた新校正法の開発」, 2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2014 年 9 月 16~18 日, 鳥取, セッション:知的精密計測(1)Q02, pp. 809-810, (2014).([ベストポスタープレゼンテーション賞](#)を受賞).



2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会  
ベストポスタープレゼンテーション賞受賞

#### ③ 国内会議発表(International Conference on Positioning Technology 2014)

Katsuaki Shirai, Shohei Ishimura, Shigeki Hirasawa, Tsuyoshi Kawanami, “Development of a New Calibration Method for Laser Velocimetry towards the Reduction of the Measurement Uncertainties — an Application of Positioning Technology to Production Engineering”, 6th International Conference on Positioning Technology (ICPT 2014): Mechatronics and Measurement in Precision Technology, November 18–21, 2014, Kitakyushu, Japan, pp. 84–89, (2014).

(2)(1)以外で当事業において作成したもの  
特にございません。

4 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 神戸大学 (コウベダイガク)

住 所： 〒657-8501

兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

申 請 者： 助教 白井 克明 (シライ カツアキ)

担 当 部 署： 自然科学系先端融合研究環 重点研究部 および 大学院工学研究科機械  
工学専攻エネルギー変換工学研究室 (コウベダイガク シゼンカガクケイセンタニユウ  
ゴウケンキュウカン ジュウテンケンキュウブ および ダイガクイン コウガクケンキ  
ユウカ キカイコウガクセンコウ エネルギーヘンカンコウガク ケンキュウシツ)

E-mail： shirai@mech.kobe-u.ac.jp

URL： <http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-ene/>